УДК 551. 56/58

Парниковый эффект: проблема выбора стратегии

В. С. Арутюнов

ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ АРУТЮНОВ — доктор химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории окисления углеводородов Института химической физики им. Н. Н. Семенова РАН. Область научных интересов: кинетика газофазных реакций, окислительная переработка углеводородов, процессы конверсии углеводородных газов в жидкие продукты, экологические проблемы энергетики и транспорта.

117334 Москва, ул. Косыгина, 4, тел. (095)939-72-87, E-mail Arutyunov@center.chph.ras.ru

Наблюдаемые климатические изменения вызывают растущую обеспокоенность мирового сообщества. Однако до сих пор нет ясности даже в таком принципиально важном вопросе: являются ли наблюдаемые изменения следствием антропогенного воздействия или естественных климатических процессов. При этом уже очевидно, что предлагаемые меры глобального характера по сокращению антропогенных выбросов парниковых газов (Киотский протокол) не только не способны предотвратить дальнейшее изменение климата, но и, по-видимому, не окажут сколько-нибудь заметного влияния на скорость этого процесса. В то же время негативное воздействие этих мер на мировую экономику вполне сопоставимо с ущербом от прогнозируемых климатических изменений. Выходом из создавшейся ситуации может быть только разработка реальной стратегии адаптации цивилизации к происходящему изменению климата при постепенном снижении антропогенной нагрузки на биосферу.

Цивилизация и климат

Наблюдаемые в течение последнего столетия климатические изменения стали одной из наиболее широко дискутируемых глобальных проблем. Собственно в самом факте изменения климата нет ничего нового или неожиданного. На протяжении всего периода существования нашей планеты происходит ее эволюция как небесного тела, сопровождающаяся изменением условий на поверхности Земли, т.е. климата. Заметные изменения климата отмечены не только в геологическом масштабе времени, но и на историческом этапе существования цивилизации, что неопровержимо доказано данными палеоклиматических исследований [1] и анализом исторических хроник. Драматические изменения климата приводили к возникновению и гибели многих великих цивилизаций [2], поэтому данные о климатических изменениях, полученные примерно за столетний период прямых инструментальных наблюдений не должны вызывать особого удивления. Ведь за десять—пятнадцать тысяч лет с момента окончания ледникового периода средняя температура земной поверхности повысилась более чем на 10 °C (рис. 1) [3] и повышение ее на 0,6—0,8 °C за прошедшее столетие (рис. 2) [4], казалось бы, не должно восприниматься столь остро.

Озабоченность вызывает не сам факт изменения климата, а скорость этого процесса, которая кажется слишком высокой по сравнению с предыдущими эпохами, хотя возможно, это историческая аберрация, вызванная ускорением развития самой цивилизации. Наиболее серьезные опасения вызывают возможные экономические и связанные с ними социальные последствия этого процесса, которые могут затронуть все человечество. Прогнозируемые в результате возможных климатических изменений повышение уровня океана и рост температуры поверхности Земли на 1—3 °C в течение столетия, безусловно, окажут серьезное влияние на хозяйственную деятельность многих стран. Но главная опасность не в этом. Даже небольшое изменение средней температуры может вызвать глобальную перестройку в сложнейшей системе циркуляции потоков в атмосфере и гидросфере плане-

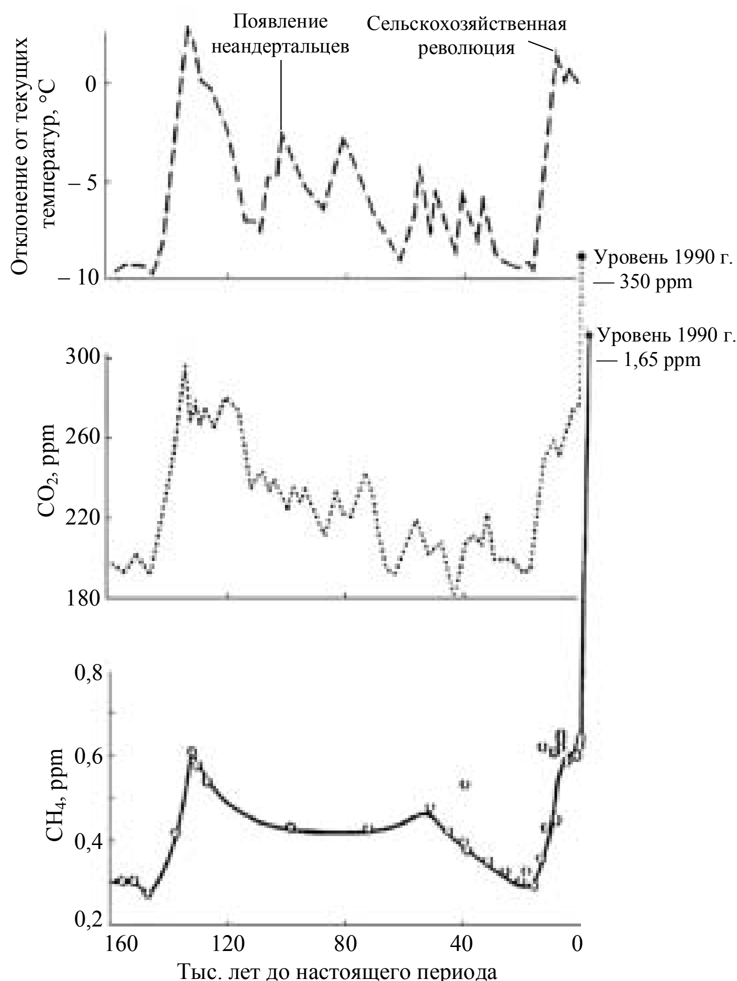


Рис. 1. Изменение глобальной температуры и концентрации парниковых газов в атмосфере Земли за последние 160 тыс. лет [3]

VISIT…

LANZAROTE

Caliente.com

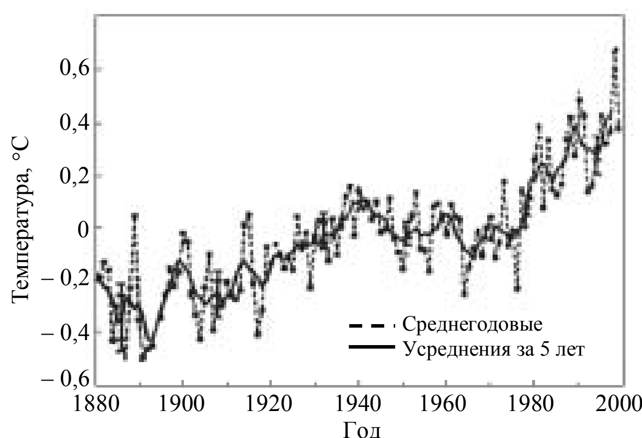


Рис. 2. Изменение средней температуры поверхности по результатам прямых метеорологических измерений [4]

ты, определяющей ее климат. На отдельных территориях температурные изменения могут многократно превысить средние значения, так что эти территории станут практически непригодными для проживания и экономической деятельности. Наиболее уязвимы в этом отношении исторические центры западноевропейской цивилизации. Уникальное сочетание климатических условий является основой экономики большинства развитых стран, расположенных в этом регионе. Истоки западноевропейской цивилизации базируются на тонком балансе природных явлений и, прежде всего, роли теплого течения Гольфстрим в формировании климата Западной Европы. Достаточно ясно осознавая этот факт, большинство европейцев проявляет серьезную озабоченность проблемой климата, а европейские политики занимают, как правило, наиболее жесткую и бескомпромиссную позицию на переговорах по этим вопросам.

Главным фактором влияния цивилизации на климат пока остается антропогенный вклад в глобальный парниковый эффект за счет дополнительной эмиссии парниковых газов в атмосферу. Поэтому озабоченные проблемой наблюдаемых климатических изменений и будущего планеты представители 160 национальных делегаций на встрече в японском городе Киото в декабре 1997 г. приняли рамочную Конвенцию по проблеме изменения климата (Киотский протокол). Было предложено не только ограничить выбросы парниковых газов, установив соответствующие национальные квоты, но и сократить объем выбросов по сравнению с уровнем 1990 года, принятого за базовую точку отсчета. Соединенные Штаты, на долю которых приходится ~38% мирового объема эмиссии парниковых газов, должны сократить к 2008—2012 гг. свои выбросы на 7%. Сокращение эмиссии парниковых газов другими промышленно развитыми странами к этому сроку должно составить в среднем 5%. Для России, учитывая ее реальное экономическое положение и большую зависимость от энергетики, квота на выброс парниковых газов не должна превышать объема 1990 г.

Конечно, любые практические меры по регулированию антропогенного влияния на климат неизбежно вызовут серьезное воздействие на мировую энергетику и экономику и потребуют беспрецедентного сотрудничества в масштабах всего мирового сообщества. Поэтому необходимо как можно тщательнее оценить реальный вклад хозяйственной деятельности в наблюдаемые климатические изменения и реальные технологические и экономические возможности современной цивилизации по регулированию эмиссии парниковых газов, а также оценить экологические и экономические последствия тех мер, которые предлагаются для решения проблемы.

Естественные причины климатических изменений

Главным источником растущей обеспокоенности относительно возможного изменения климата стали такие бесспорно существующие и взаимно коррелирующие явления, наблюдаемые на протяжении последних 100—150 лет, как увеличение антропогенной эмиссии парниковых газов, прежде всего CO_2 и CH_4; рост концентрации этих газов в атмосфере; повышение средней температуры земной поверхности примерно на 0,6—0,8 °С за последнее столетие.

В общественном сознании достаточно прочно утвердилось представление о точно такой же последовательности в цепочке причинно-следственных связей, что побуждает политическую элиту под давлением общественного мнения предпринимать (или хотя бы декларировать) меры, направленные на сокращение антропогенной эмиссии парниковых газов. Эмоциональной посылкой этого взгляда стало уже утвердившееся в массовом сознании понимание того, что, по выражению В.И. Вернадского, человек стал «основной геологообразующей силой планеты», и что антропогенная деятельность вполне способна влиять на изменение климата. Основным же научным аргументом в пользу такой интерпретации является именно рост атмосферной концентрации парниковых газов, в частности, диоксида углерода до более 360 ppm и метана до 1,7 ppm к концу XX столетия. Поэтому научная общественность, несмотря на отсутствие достоверных данных о вкладе антропогенной деятельности в рост парникового эффекта и изменение климата, в целом поддерживает меры политического и экономического характера, направленные на уменьшение выброса парниковых газов. К принятию таких мер подталкивают и объективные данные о нарастающей неустойчивости глобальных атмосферных процессов, косвенно свидетельствующие о повышении вероятности бифуркационной перестройки климата.

Однако пока нет строгих научных доказательств существования причинно-следственной связи между этими явлениями в том порядке, как они перечислены выше. Глобальные модели, на которых основаны современные прогнозы, содержат большие неточности в определении базовых параметров, прежде всего естественных истоков и стоков парниковых газов в атмосфере, которые, пока еще, как правило, значительно превышают антропогенные потоки. Современные модели климатических явлений отражают наше еще слабое понимание сложнейших нелинейных геологических, химических и биологических процессов с участием парниковых газов в литосфере, почве, гидросфере и атмосфере. Поэтому разброс в прогнозах очень велик, они показывают скорее тенденции, чем конкретные значения прогнозируемых параметров. Это хорошо иллюстрируют результаты, полученные Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК), проанализировавшей 40 различных сценариев выбросов диоксида углерода на протяжении XXI века (рис. 3) [5]. Будущие объемы антропогенных выбросов газов с парниковым эффектом являются следствием процессов в очень сложных динамических системах, на которые оказывают

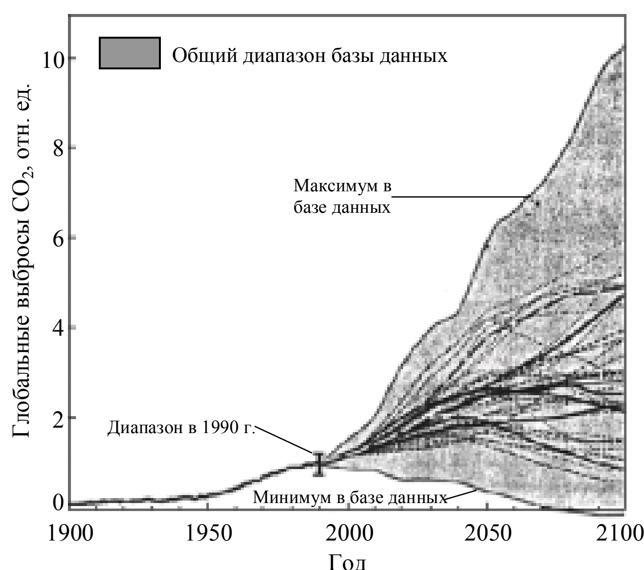


Рис. 3. Результаты моделирования различных сценариев глобальных выбросов диоксида углерода в XXI веке [5]

влияние такие плохо прогнозируемые факторы, как демографическое и социально-экономическое развитие, технологическая эволюция.

В принципе, существуют вполне достаточные неантропогенные, естественные причины наблюдаемого изменения средней температуры земной поверхности, которые могут быть связаны с долговременной эволюцией или циклическими колебаниями климата, вызываемыми изменением солнечной активности, параметров земной орбиты и наклона земной оси, геологической эволюцией планеты, в том числе изменением скорости ее дегазации, вулканической активности, теплосодержания океанических вод и т.д., причем повышение концентрации CO_2 и метана в атмосфере может быть не причиной, а прямым следствием этих явлений. Вот только некоторые возможные естественные причины наблюдаемых климатических изменений.

Климатический режим на Земле определяет прежде всего солнечная радиация. Ее поток, перпендикулярный к сечению Земли, равен ~1370 Вт/м^2. С учетом того, что поверхность Земли в четыре раза превышает ее сечение, а 30% излучения отражается, средний поток солнечной энергии, перпендикулярный земной поверхности, составит ~240 Вт/м^2 [6]. Изменение этого потока даже на 0,1% (величина, примерно соответствующая колебаниям в течение 11-летнего цикла солнечной активности) вызывает климатическое воздействие в ~0,24 Вт/м^2, что соответствует почти 20% от суммарного климатического воздействия диоксида углерода за последние 150 лет. Сопоставление кривых солнечной активности и среднегодовых температур за последнее столетие указывает на их четкую корреляцию [3]. А реконструкция изменения солнечной активности и влияния этого процесса на климат показывает, что, по крайней мере, половина наблюдаемых температурных изменений за период с 1900 года может быть объяснена этой причиной [6].

Другая возможная причина связана с тем, что положение земной оси по отношению к солнцу не совсем стабильно, время от времени она довольно резко смещается назад или вперед, что оказывает соответствующее влияние на климат. Не исключено, что определенные колебания может испытывать огромный поток тепловой энергии, выделяющейся за счет продолжающейся дифференциации земного вещества, направленный от формирующегося тяжелого ядра планеты к ее поверхности [3].

Решающее значение для понимания динамики климата имеет корректная оценка изменения теплосодержания океанических вод. Это единственное место на земной поверхности, где может накапливаться энергия радиационного дисбаланса. Данные показывают, что теплосодержание океана увеличилось на $2 \cdot 10^{23}$ Дж за период с середины 1950-х годов до середины 1990-х годов. Наиболее простое объяснение этого — происходящие изменения в атмосферных процессах и их влияние на тепловой баланс.

Моделирование климатических явлений показало, что огромное влияние на климат оказывает характер океанических течений. Именно этой причиной может быть объяснен более теплый климат некоторых предшествовавших геологических эпох [7]. Наиболее близкая аналогия возможных климатических изменений может быть получена из анализа климата эпохи Плиоцена, отстоящей от нашего времени примерно на 3 млн. лет (период от 5 до 1,8 млн. лет назад). Тогда средняя температура поверхности Земли превышала современную более чем на 1 °C. Именно в этот период появились прямые предки человека и начались циклические оледенения в Северном полушарии. Сравнение с климатическими условиями этой эпохи удобно также тем, что конфигурация земной поверхности практически соответствовала современной, а большинство видов растений и животных соответствовало современным видам. Хотя достоверно неизвестно, что именно явилось причиной потепления в Плиоцене, но, как показывают палеоклиматические исследования, ему также отвечал высокий уровень парниковых газов, превышающий современный, по крайней мере, на 100 ppm. Однако моделирование климата Плиоцена, проведенное специалистами NASA [8], не подтвердило гипотезу о том, что потепление было вызвано повышением концентрации CO_2. Оказалось, что необходимо четырехкратное увеличение концентрации диоксида углерода для объяснения произошедших климатических изменений. В то же время примерно 30%-ное изменение в меридиональном тепловом потоке, переносимом океаническими течениями, было достаточным для того, чтобы объяснить наблюдаемую климатическую картину. Конечно, могли существовать и другие неизвестные факторы, влиявшие на температуру и концентрацию диоксида углерода в эту эпоху.

Наблюдаемые изменения концентраций парниковых газов в Плиоцене и в современную эпоху могут являться не причиной, а прямым следствием температурных изменений, вызванных одной из перечисленных выше причин. Например, даже небольшое повышение средней температуры поверхностного слоя океана приводит к эмиссии огромного объема диоксида углерода за счет изменения его растворимости в морской воде. Одновременно возможен резкий выброс в атмосферу гигантских количеств метана в результате теплового разложения неустойчивых газовых гидратов на морском шельфе и на суше [9]. А сильная положительная обратная связь, реализуемая через механизм парникового эффекта, может многократно усиливать даже небольшие температурные колебания, вызванные любой из возможных причин.

У специалистов нет уверенности в долговременности наблюдаемой тенденции повышения температуры и в невозможности смены знака температурного хода в

ближайшее время. Высказываются доводы в пользу большой роли конвективных процессов теплопереноса в плотной земной атмосфере, что ставит под сомнение критическую роль наблюдаемого изменения концентрации парниковых газов в росте средней температуры земной поверхности [3]. Необходимо также учитывать, что результаты антропогенной деятельности практически в той же степени способствуют явлениям, понижающим среднюю температуру земной поверхности. Нет строго обоснованного доказательства существенного преобладания тенденции к «положительному» вкладу антропогенной деятельности.

Наконец, климат Земли может испытывать достаточно сильные флуктуации и без всяких внешних воздействий. Оценки на основе глобальных моделей показывают, что на протяжении столетия колебание средней температуры поверхности может достигать 0,4 °С даже при фиксированном уровне солнечной радиации и постоянной концентрации парниковых газов [10]. Эти флуктуации являются следствием нелинейных процессов, характеризующих поведение атмосферы планеты. Благодаря огромной тепловой инерции океана, хаотические изменения в атмосфере могут вызывать последействие, сказывающееся десятилетия спустя. И для того, чтобы дополнительные воздействия на атмосферу имели вполне определенный направленный эффект, они должны, по крайней мере, заметно превышать естественный флуктуационный «шум».

Антропогенное влияние на состав атмосферы

Парниковый эффект, безусловно, один из существенных климатических факторов. Благодаря присутствию парниковых газов в атмосфере средняя температура земной поверхности повышается на ~33 °С [3, 11], достигая примерно 290 К, что и создает условия для существующего на Земле многообразия жизненных форм, включая человека и созданную им цивилизацию. К основным парниковым газам, попадающим под действие Киотского протокола, относят CO_2, CH_4, N_2O, SF_6 и фреоны. Эти газы сильно различаются не только по своей концентрации в атмосфере, но и по коэффициентам поглощения инфракрасного излучения. Для оценки относительного влияния различных парниковых газов на климат обычно используют величину глобального парникового потенциала (Global Warming Potential — GWP) [12] или «климатическое воздействие» (climate forcing) [11], определяемое как усредненное изменение достигающего поверхности теплового потока (Вт/м^2) за счет изменения концентрации данного парникового газа в атмосфере.

Основным парниковым газом и с точки зрения его влияния на изменение климата (более 60%), и с точки зрения естественных и антропогенных потоков в атмосфере является диоксид углерода. С начала индустриальной революции его концентрация в атмосфере возросла примерно на 30% (см. рис. 1). Время жизни диоксида углерода в атмосфере определяется скоростью обмена с поверхностью океана и оценивается в 10 лет, но при учете перемешивания океанских вод и поглощения диоксида углерода осадочными породами, реальное время релаксации его концентрационных изменений может достигать многих десятков и даже сотен лет [13, 14]. Метан Ќ— второй по значению парниковый газ. Его вклад в антропогенный парниковый эффект оценивается в 18—19% [15], время жизни в атмосфере ~10 лет, а концентрация с 1850 года возросла более чем в два раза (см. рис. 1). За этот же период концентрация закиси азота — другого парникового газа увеличилась на 15%. Что касается фреонов, которые не обнаруживались в атмосфере до 1950-х годов, то они имеют исключительно антропогенное происхождение. В связи с их ролью в разрушении стратосферного озона, в соответствии с Монреальским протоколом, их производство резко сокращено. Однако в силу большого времени жизни в атмосфере (50—100 лет) их концентрация будет сокращаться только постепенно в течение всего XXI столетия.

Основным источником антропогенной эмиссии CO_2 в атмосферу (примерно 6,5 млрд. т углерода в год) является энергетика. В США она ответственна за эмиссию 98% диоксида углерода, 24% метана и 18% закиси азота. Антропогенная эмиссия метана связана главным образом с сельским хозяйством, прежде всего с животноводством и рисоводством [15]. Несмотря на значительные антропогенные выбросы этих газов, их потоки пока еще не только много ниже естественных, но и много ниже уровня неопределенности в оценке естественных потоков. Например, современные представления о генезисе залежей природного газа в земной коре все более склоняются в пользу их абиогенного происхождения в результате захвата естественными «ловушками» небольшой части мощного потока, являющегося следствием продолжающейся дегазации планеты. При этом в атмосферу, по оценкам, ежегодно поступает до 2 трлн. м^3 метана [16]. Точность как этой, так и других оценок естественных и антропогенных источников [15, 17] поступления парниковых газов в атмосферу не превышает фактора 2, и поэтому пока трудно говорить о возможности строгого учета антропогенного вклада в их эмиссию.

Еще более неопределенны оценки природных биохимических процессов кругооборота метана и диоксида углерода. Метан, попадающий в атмосферу, составляет всего 0,5% от полного кругооборота углерода в природе, хотя примерно половина всего количества углеводородов органического происхождения разлагается до метана анаэробной микрофлорой. Разница в потоках образующегося в почве и поступающего в атмосферу метана обусловлена деятельностью аэробных метанпоглощающих микроорганизмов, располагающихся между анаэробными отложениями, в которых происходит образование метана, и атмосферой [18]. Есть данные [19], свидетельствующие о протекании и анаэробных биохимических процессов окисления метана в отложениях на морском дне с образованием диоксида углерода, то есть не исключено, что в анаэробных условиях происходит неоднократное взаимопревращение этих газов. Все это многообразие процессов приводит к дополнительной неопределенности в оценке влияния CO_2 и CH_4 на климат, поскольку их способность вызывать парниковый эффект сильно различается. Большой неопределенностью характеризуются и данные о природных процессах поглощения и связывания CO_2.

На климатические процессы влияет также атмосферная концентрация водяных паров и содержание озона в стратосфере. Согласно результатам моделирования, уменьшение концентрации озона за период 1959—1999 гг. ответственно за изменение средней температуры земной поверхности примерно на –0,09 °С. За этот же период концентрация водяных паров, увеличившаяся в результате изменения климата и окисления возросшего количества атмосферного метана, дала вклад в повышение температуры на +0,26 °С.

Таким образом, суммарный вклад этих газов составляет +0,17 °С, т.е. ~33% от экспериментально наблюдаемой величины. Такая большая величина возможного вклада этих газов в изменение температуры земной поверхности не противоречит существующим представлениям, если учесть имеющиеся неопределенности в расчетах климатических воздействий различных источников. К 2050 году суммарный эффект этих газов может возрасти до +0,43 °С, что составит 10—15% от вклада остальных парниковых газов [20].

Гидрологический цикл и формирование облачного покрова — один из существенных элементов, влияющих на тепловой баланс планеты. Являясь прямым следствием климатических условий, гидрологическое состояние атмосферы в свою очередь само оказывает сильное влияние на тепловые потоки, что приводит также к серьезным неопределенностям при моделировании возможных климатических изменений.

Большое влияние на климат оказывают атмосферные аэрозоли. Они охлаждают атмосферу, отражая солнечное излучение. Наибольшее внимание уделяется сульфатным аэрозолям, одному из основных антропогенных поллютантов, образующимся при сжигании серосодержащих топлив. Климатическое воздействие антропогенных аэрозолей — один из главных источников неопределенности при оценке будущих климатических изменений. Обычно принято считать, что аэрозоли оказывают охлаждающее действие на поверхностную температуру из-за рассеивания ими солнечной радиации. Кроме того, аэрозоли оказывают косвенное воздействие на климат, изменяя свойства облаков. Однако помимо эффекта рассеяния солнечного излучения, частицы аэрозоля, в частности сажевые частицы, поглощают солнечное излучение и рассеивают его в виде теплового излучения. Хотя это явление труднодоступно для исследования, есть данные о том, что оно может оказывать сильный эффект, приводящий к повышению поверхностной температуры и способный компенсировать охлаждающее влияние остальных компонентов аэрозоля. Его влияние может оказаться сравнимым с влиянием таких традиционных парниковых газов, как метан [21].

Анализ ситуации и выбор стратегии

При всей очевидности проблемы антропогенного влияния на парниковый эффект решить ее чрезвычайно сложно. Моделирование механизма влияния парниковых газов на земной климат сопряжено с очень большими неопределенностями, некоторые из них имеют принципиально неустранимый характер. Даже в гипотетическом случае полного учета всех естественных и антропогенных источников парниковых газов и глубокого понимания механизмов их кругооборота и превращения в природе невозможно учесть неизбежные и непредсказуемые естественные климатические флуктуации в том сложнейшем «климатическом механизме», который определяет условия на поверхности нашей планеты.

На рис. 4 показаны полученные специалистами NASA на основе моделирования оценки величины климатического воздействия различных факторов за период с 1850 г. до наших дней. Хотя изменение концентрации CO_2 оказывает наибольшее влияние на климат, это не исключает роли других факторов. Влияние метана составляет половину этой величины, а охлаждающее воздействие атмосферных аэрозолей, особенно сульфатов, а также органических аэрозолей и сажи, и вызываемое ими изменение облачного покрова, согласно этим оценкам, практически компенсирует положительный эффект CO_2 [22]. Воздействие аэрозолей оценить достаточно трудно, но определенно оно существенно. При этом, поскольку сжигание ископаемых топлив приводит к образованию как аэрозолей, так и CO_2, то суммарное воздействие на атмосферу процессов, приводящих к образованию диоксида углерода много меньше, чем оцененное по одному лишь эффекту накопления этого газа в атмосфере (1,4 Вт/м^2). Таким образом, если эти оценки верны, основное воздействие на климат оказывает не повышенное содержание CO_2 в атмосфере, а другие парниковые газы, и именно на борьбе с их выбросами должны быть сосредоточены основные усилия. Согласно оценкам этой же группы специалистов, за 17 лет с 1979 по 1996 гг. суммарное воздействие на поверхностную температуру «положительных» и «отрицательных» антропогенных факторов примерно компенсировали друг друга, дав нулевой эффект. Наблюдавшееся за это время повышение температуры на 0,2 °С

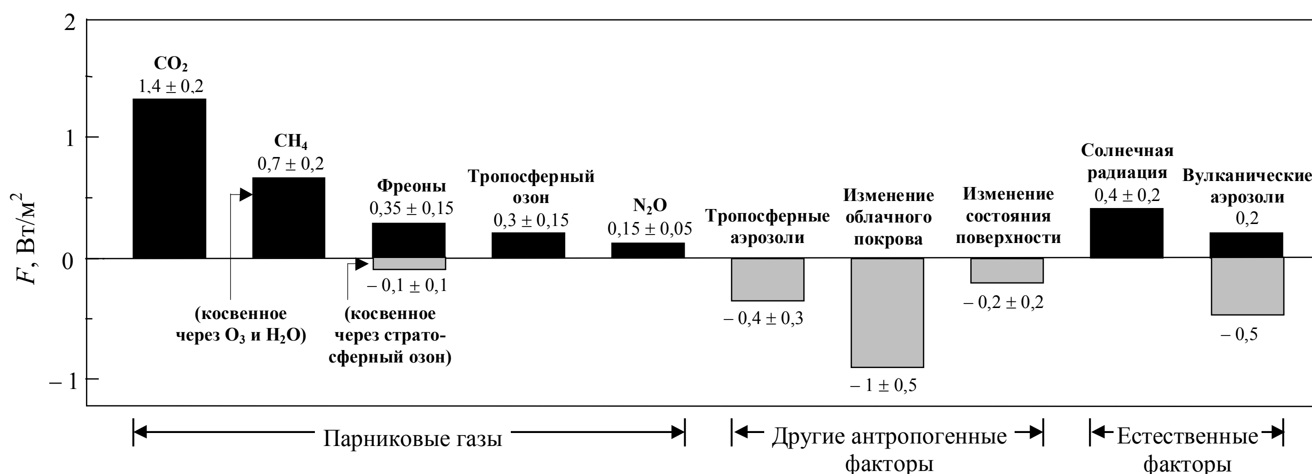


Рис. 4. Оценка воздействия на климат (*F*) различных атмосферных факторов с 1850 по 2000 г. [22].

Цифры — усредненное изменение достигающего поверхности теплового потока (Вт/м^2) за счет изменения данного фактора

объясняется радиационным дисбалансом атмосферы за счет изменений в ее составе, произошедших до 1979 года. Запасенная за счет этого дисбаланса в океане тепловая энергия будет, по их мнению, приводить к рекордным температурам еще в течение ряда лет [23]. Пока этот прогноз подтверждается. Во всяком случае скорость нарастания климатического воздействия диоксида углерода и закиси азота с конца 1970-х годов резко замедлилась, а метана пошла на убыль, несмотря на 30%-ное увеличение добычи углеродного топлива к концу 1990-х годов (рис. 5) [22]. Это показывает, что темпы изменения концентрации диоксида углерода и метана в атмосфере не коррелируют с антропогенной активностью в области добычи и использования углеводородных топлив. Кстати, радиоуглеродный анализ метана из воздушных пузырьков в пробах антарктического льда показал, что увеличение его концентрации в атмосфере началось примерно 400 лет назад [24], т.е. задолго до промышленной революции, и имеет, в основном, неантропогенную природу.

Согласно климатическим моделям, при отсутствии контроля за эмиссией парниковых газов к 2100 году

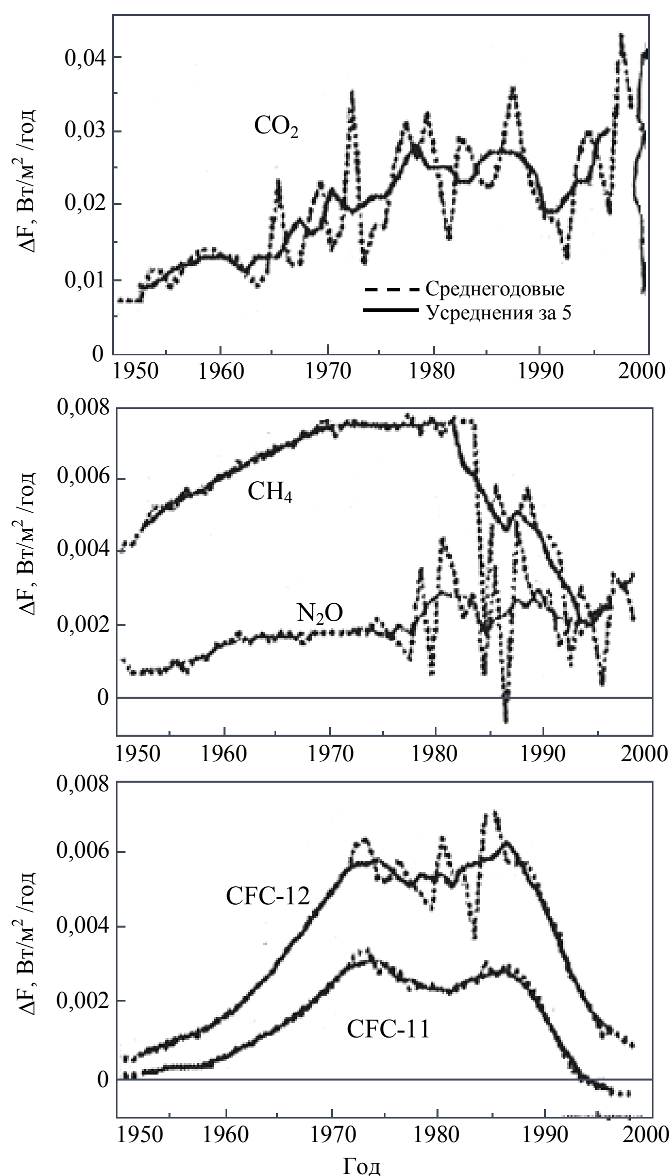


Рис. 5. Скорость изменения климатического воздействия (Δ*F*) различных парниковых газов [22]

концентрация диоксида углерода может увеличиться на 30—150% по сравнению с современным уровнем. Это может привести к повышению средней глобальной температуры земной поверхности на 1—3,5 °С к 2100 году при значительных региональных вариациях этой величины [25], что, безусловно, вызовет серьезные последствия для экосферы и хозяйственной деятельности во многих регионах планеты. Однако учет в этих же моделях последствий выполнения мер, предусмотренных Киотским протоколом, показывает их очень незначительное влияние на будущий климатический режим. Если предположить, что условия протокола будут полностью выполнены за счет снижения эмиссии CO_2, сокращение концентрации диоксида углерода в атмосфере по сравнению со сценарием, в котором вообще отсутствует регулирование эмиссии, составит к 2100 году от 20 до 80 ppm. В то же время для стабилизации его концентрации на уровне хотя бы 550 ppm необходимо снижение концентрации CO_2 минимум на 170 ppm. Во всех рассмотренных сценариях, даже при условии постоянного ежегодного снижения антропогенной эмиссии диоксида углерода на 1% после выполнения условий Киотского протокола и вплоть до 2100 года, результирующее влияние этих мер на изменение температуры оказывается незначительным, ее прирост уменьшится всего на 0,08—0,28 °С [12].

Предусмотренная Киотским протоколом 1997 г. цель — достижение ведущими индустриальными странами к 2012 г. уровня эмиссии парниковых газов в 95% от уровня 1990 г. — очень тяжелая задача. И при этом нет никакой уверенности, что это окажет существенное влияние на стабилизацию климата XXI века. У специалистов нет твердой уверенности в том, что серьезные меры и ограничения, накладываемые Протоколом и требующие огромных расходов, действительно будут оправданы. Например, Международная комиссия по изменению климата (IPCC) в докладе 1995 г. лишь очень мягко констатировала, что «имеющаяся сумма данных ... наводит на мысль о различимом влиянии человеческой деятельности на глобальный климат» и «хотя глобальные данные наводят на мысль, ... они не могут рассматриваться как неотразимое свидетельство существования очевидной и значительной причинной связи между антропогенной деятельностью и изменением температуры земной поверхности» [26]. С тех пор не было предоставлено новых убедительных данных, способных привести к более жестким формулировкам.

Таким образом, Киотский протокол ставит цели, относительно которых невозможно сказать ни то, что они необходимы, ни то, что они будут достаточны. Во имя будущего человечества предлагается принять срочные и весьма дорогостоящие меры, которые могут оказать крайне негативное влияние на экономику и уровень жизни во всех странах на десятки лет вперед. Ведь ничто не дается бесплатно, за все приходится расплачиваться, причем не столько деньгами, сколько энергией и ресурсами. И за прошедшие три года все громче стали звучать голоса сомневающихся. Первоначальный энтузиазм постепенно сменяется более трезвым и скептическим взглядом. За три года из 160 стран, подписавших «протокол о благих намерениях», его ратифицировали только тридцать стран, в основном островные государства Океании, для которых энергетические проблемы носят достаточно абстрактный характер. Практическая реализация предусмотренных протоколом мер и перспективы его ратификации сколько-нибудь значимыми в мировой экономике странами близки к нулю.

Согласно данным Агентства по охране окружающей среды, в США среднегодовой уровень роста эмиссии за период с 1990 г. составил 1,2%. В пересчете на эквивалентное количество CO_2 общий объем эмиссии парниковых газов в США составил в 1999 г. 6,75 млрд. т. Таким образом, США не только не приблизились к выполнению принятых по Киотскому протоколу обязательств уменьшить к 2012 году выбросы парниковых газов на 7%, но и превзошли уровень 1990 года уже на 11,6% [27].

На встрече в Лионе в сентябре 2000 года по разработке практических мер по реализации условий Киотского протокола 2000 участников, представляющих 160 правительств и 68 организаций, не смогли достигнуть соглашений по важнейшим вопросам: как определять стоки CO_2, как засчитывать его поглощение сельскохозяйственными культурами, какой объем эмиссии развитые страны могут «приобрести» за счет выплат или вложений в другие страны, какие меры должны приниматься при нарушении условий Протокола, каков объем финансовой помощи для решения этих вопросов должен быть предоставлен развивающимся странам, может ли развитие ядерной энергетики идти в зачет мер по сокращению эмиссии и т.п. Маловероятно, чтобы индустриальные страны пошли на подписание протокола до полной проработки всех деталей. Результаты следующей встречи в ноябре 2000 года в Гааге даже на дипломатическом языке характеризуются не иначе, как «полный провал»: экономисты и политики начали осознавать, во что реально обойдется экономике их стран практическая реализация условий Протокола.

Контроль за любыми экологически проблемными выбросами требует значительных затрат и накладывает тяжелое бремя не только на производителя, но и прежде всего на потребителя. Такса за выбросы углерода, применяемая некоторыми странами для стимулирования сокращения выбросов CO_2, составляет до 50 долл. на тонну CO_2, что приводит к дополнительным затратам в 3 цента/кВт•ч. Типичная стоимость удаления поллютантов на электростанциях (цент/кВт•ч) [28]:

CO_2	1,5—4,0
SO_x	1,5—3,5
NO_x	0,5—2,0
Твердые частицы	0,5—2,8

К 1990 году прямые затраты и косвенное сдерживающее влияние экологического регулирования оказало сильное влияние на американскую экономику. По оценкам, в отсутствие экологического регулирования ВВП США мог быть, вероятно, на 20% выше, чем реально достигнутый к этому времени. К каждому доллару прямых затрат на сокращение выбросов необходимо добавить еще 3—4 долл., потерянных за счет снижения эффективности и объема производства [29]. На самом деле чрезмерный прессинг экологического контроля на промышленность — далеко не безобидное явление и не может основываться на философии превентивных мер. Любые дополнительные затраты энергии и ресурсов на решение экологических проблем одновременно в какой-то мере всегда усугубляют те же экологические проблемы, неизбежно приводя к дополнительной эмиссии антропогенных загрязнений в окружающую среду, поэтому оптимальное экологическое регулирование требует серьезного обоснования как достаточности, так и необходимости принимаемых мер. В промышленных кругах, наряду с пониманием важности экологических вопросов, одновременно зреет и сопротивление огульному экологическому экстремизму, вытесняющему промышленное производство на периферию «цивилизованного» мира, что подрывает экономику собственных стран.

Огромный объем антропогенного диоксида углерода делает задачу регулирования его эмиссии путем улавливания выбросов практически нереальной.
Например, ежегодные затраты экономики Соединенных Штатов в 2008—2012 гг. на меры по выполнению условий Киотского протокола оцениваются в 77—338 млрд. долл. (в ценах 1992 г.). Это составляет 1—3,6% от ожидаемого ВВП на этот период. Реализация необходимых мер приведет к 2010 году к снижению темпов экономического развития страны, увеличению цен на бензин на 11—53% и отпускаемой энергии — на 17—83% [30]. Это при том, что ожидаемый к 2050 году ежегодный ущерб всей мировой экономике из-за прогнозируемого повышения температуры оценивается в 300 млрд. долл. [31], и нет уверенности, что принимаемые меры действительно скажутся на темпах глобального потепления. Неудивительно, что идея регулировать выбросы парниковых газов, особенно CO_2, так, как это делается в отношении химических загрязнителей атмосферы, вызывает все более серьезные возражения в промышленных и политических кругах, а нынешний президент США Дж. Буш открыто выражает свою оппозицию Киотскому протоколу. Видимо, настала пора оценить, насколько будут оправданы приносимые жертвы, и что человечество получит в результате достижения провозглашенных целей.

Если меры по улавливанию и переработке промышленных выбросов метана и других углеводородов могут быть не только экологически, но и экономически оправданы [32, 33], то в отношении диоксида углерода, доля которого в антропогенном парниковом эффекте оценивается в 61%, они сопряжены с огромными затратами. Например, Департамент энергетики США объявил в качестве цели необходимость улавливания к 2025 г. значительной части (до 1 млрд. т/год) потенциальных выбросов CO_2, выделив на исследовательские работы в этом направлении в прошлом году 9,2 млн. долл. с перспективой удвоения этой суммы в текущем году [34]. Однако стоимость улавливания одной тонны CO_2 в настоящее время составляет от 100 до 300 долларов, что значительно превышает стоимость тонны нефти (а каждая тонна сгоревшего углеводородного топлива приводит к образованию примерно трех тонн диоксида углерода). Даже если удастся значительно снизить эти затраты, что выглядит маловероятным, они будут все равно огромны.

Нет смысла подробно останавливаться на предлагаемых методах выделения CO_2 из разбавленных азотом отходящих газов электростанций, в которых его концентрация составляет всего 10—12%, и его последующей утилизации или захоронения. Этому вопросу был посвящен, например, специальный симпозиум «Улавливание, использование и сокращение выбросов CO_2», проведенный в 2000 году Секцией химии горения Американского химического общества (ACS) в рамках ежегодной 220-ой конференции ACS [35]. Многие предлагаемые методы с научной и технологической точек зрения действительно интересны и оригинальны. Но все они требуют затрат энергии, сопоставимых с той энергией, которая получается в результате выделения улавливаемого CO_2!

Проведем простые оценки. Среди предлагаемых методов утилизации CO_2 наиболее часто обсуждаемый и технически реальный – закачка его на морское дно на

глубину в несколько километров, где он будет оставаться в жидком состоянии, пока не произойдет его биологическое или химическое связывание. На проведение соответствующих лабораторных и натурных экспериментов уже затрачено несколько миллионов долларов. Поскольку количество выбрасываемого в атмосферу антропогенного CO_2 соответствует количеству добываемого на планете углеродного топлива, то можно с большой долей вероятности предположить, что на утилизацию CO_2 потребуется не меньше средств и энергии, чем затрачивается сейчас на добычу углеводородного топлива. Это значит, что топливной отрасли придется удвоить свои мощности, а цена топлива возрастет в два раза. Аналогичную оценку можно получить и другим путем. На перекачку природного газа в среднем на расстояние порядка 2000 км при давлении в магистральных трубопроводах 65—75 атм Россия затрачивает более 10% добываемого газа. Следовательно, для сбора CO_2, его транспортировки в среднем на такое же расстояние и закачки на глубину в несколько километров (давление ~700 атм) потребуется примерно в десять раз больше энергии, т.е. опять-таки придется удвоить количество добываемого топлива. Любые технические усовершенствования с учетом КПД реальных процессов и затрат на производство и обслуживание соответствующего оборудования вряд ли кардинально улучшат эту безрадостную картину.

Рассчитывать на глобальную роль возобновляемых или неуглеродных источников энергии, за исключением ядерной энергетики, вряд ли реально по причине низкой плотности потока энергии в этих источниках [36, 37]. Например, КПД преобразования солнечной энергии некоторыми сельскохозяйственными культурами достигает 5—7%. Эта величина не отличается принципиально от КПД реальных фотохимических преобразователей (около 25%) при том, что сельскохозяйственное производство требует значительно меньших капитальных затрат. Но именно из-за низкой плотности потока первичной энергии (солнечной радиации на земной поверхности) сельскохозяйственное производство даже в наиболее развитых странах относится к наименее рентабельной (а точнее, просто убыточной) области хозяйственной деятельности. Кстати, часто выдвигаемый тезис об «экологической чистоте» возобновляемых источников энергии, например, энергетики, основанной на сжигании растительной массы, также вызывает большие сомнения. Как правило, такие оценки не учитывают экологические выбросы, образующиеся при производстве и обслуживании огромного и быстро выходящего из строя парка механизмов, обеспечивающих выращивание и сбор соответствующего объема растительной массы, а также объем сжигаемого при этом топлива, т.е. оценки мягко говоря, некорректны.

Поэтому стратегические усилия мирового сообщества должны быть направлены прежде всего на более рациональное использование энергетических ресурсов, снижение удельной энергоемкости производства и удельного расхода энергии на поддержание достойного жизненного уровня. Только благодаря предпринимаемым промышленностью усилиям США на протяжении последних лет при быстром росте ВВП удается удерживать практически стабильный уровень эмиссии парниковых газов на душу населения, что следует расценивать как наиболее весомый вклад в сдерживание темпов антропогенного воздействия на атмосферу. Выброс CO_2 на 1 млн. долл. произведенного ВВП сократился в США с 330 т в 1980 году до менее чем 240 т в 1998 году [38]. Другие ведущие промышленные страны также заметно сократили или по крайней мере ограничили удельный выброс парниковых газов. Великобритания закрыла малоэффективные угольные шахты, перейдя на использование нефти и газа месторождений Северного моря, Франция сделала упор на атомную энергетику, Германия повысила эффективность энергопотребления в восточной части страны. Выброс CO_2 в России сократился на 33% не только за счет снижения объемов производства, но и за счет массового перехода промышленности и электроэнергетики на природный газ.

Огромный вклад в глобальное сокращение эмиссии CO_2 может дать использование современных технологий в энергетике. Например, комбинированные газотурбинные-паротурбинные системы с предварительной газификацией твердого топлива или тяжелых остатков нефтепереработки позволяют снизить эмиссию CO_2 на 40%, а эмиссию SO_x, NO_x, CO и твердых частиц на 80%. С технической точки зрения уменьшение эмиссии CO_2 является результатом более эффективного использования топлива (КПД около 41%) по сравнению с типовыми электростанциями старого образца (КПД около 32%). Дальнейшее повышение эффективности до 49% может быть достигнуто за счет более современных газовых турбин [28].

Другим направлением на пути снижения антропогенного прессинга может стать разработка мер по сокращению выбросов парниковых газов, оказывающих большое климатическое воздействие (оксиды азота, тропосферный озон, сажа), в том числе метана, имеющего самостоятельную энергетическую ценность, что делает его сбор и утилизацию экономически оправданными. Рентабельные малотоннажные установки могли бы вовлечь в промышленную переработку попутные и нефтезаводские газы, в большом объеме (до 4—5% от мировой добычи природного газа) выбрасываемые в атмосферу или сжигаемые в факелах при современных технологиях добычи и переработки углеводородов [32, 33]. Эмиссия метана может быть также существенно сокращена за счет агротехнических мероприятий, например, при производстве риса — одного из основных антропогенных источников этого газа. Одновременно, видимо, необходим анализ возможных мер по адаптации мировой экономики к предстоящим климатическим изменениям, что, возможно, окажется более рациональным и реальным, чем попытка предотвратить недостаточно хорошо понимаемые глобальные климатические процессы.

В долгосрочной перспективе предпринимаемые меры по ограничению выброса парниковых газов все равно не смогут устранить серьезный антропогенный вклад в повышение температуры поверхности планеты. Это неизбежное следствие развития цивилизации. Переход на источники энергии, не связанные с выделением парниковых газов, не остановит роста потока энергии, рассеиваемой цивилизацией в окружающую среду. Уже сейчас эта величина превышает 0,01% общего потока солнечной энергии на поверхность планеты. Если мы будем исходить из сценария демократического развития общества, исключающего насильственное подавление одной части населения планеты другой, то относительная стабилизация энергопотребления возможна только после достижения всеми странами уровня энергопотребления, достигнутого развитыми странами (~10 кВт/чел.). Это потребует минимум 100-кратного роста производства энергии. Т.е. человечество должно будет производить и рассеивать в окружающую среду

энергию, превышающую 1% потока падающей на Землю солнечной радиации. Но только одно это может привести к повышению средней температуры земной поверхности (~290 К) на ~3 °С. Попытки же искусственно ограничить повышение интенсивности потоков преобразования энергии человечеством, видимо, равносильны попыткам остановить ход прогресса, и могут привести к деградации общества. Настала пора признать, что экологическая стабилизация на Земле принципиально невозможна без снижения антропогенной нагрузки на биосферу, т.е. населения планеты, минимум на порядок. Поиск путей достойного решения этой задачи — величайший вызов цивилизации за всю историю ее существования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Будыко М.И., Ронов А.Б., Яншин А.Л.* История атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1985.
2. *Гумилев Л.Н.* Этногенез и биосфера Земли. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989.
3. *Сорохтин О.Г., Ушаков С.А.* Глобальная эволюция Земли. М.: Изд-во МГУ, 1991.
4. http://www.giss.nasa.gov/research/observe/surftemp/1999_fig1.gif.
5. Сценарии выбросов. Специальный доклад рабочей группы III МГЭИК. 2000. Межправительственная группа экспертов по изменению климата.
6. *Lean J., Rind D.* J. of Climate, 1998, v. 11, p. 3069.
7. *Rind D., Chandler M.A.* J. Geophys. Res., 1991, v. 96, p. 7437.
8. Pliocene global warming. NASA Goddard Institute for Space Studies. http://www.giss.nasa.gov./research/paleo/pliocene/page3.html
9. *Kennett J.P., Cannariato K.G., Hendy I.L., Behl R.J.* Science, 2000, v. 288, p. 128.
10. *Hansen J.E., Lacis A.A.* Nature, 1990, v. 346, p. 713.
11. *Hansen J.E.* The global warming debate, NASA Goddard Institute for Space Studies. http://www.giss.nasa.gov./edu/gwdebate/
12. *Wigley T.M.L.* Geophys.Res.Lett., 1998, v. 25, № 13, p. 2285.
13. *Ledley T.S., Sundquist E.T., Schwartz S.E. e. a.* Climate change and greenhouse gases. 1999. http://www.agu.org/eos_elec/99148e.html
14. *Maier-Reimer E., Hasselmann K.* Climate Dynamics, 1987, v. 2, p. 63.
15. *Титлянова А.А.* Обозрение прикладной и промышленной математики, 1994, т. 1, с. 974.
16. *Валяев Б.М.* Газовая промышленность, 1997, № 7, с. 6.
17. Углекислый газ в атмосфере. Под ред. А. Фольца, В. Баха и др. М.: Мир. 1987, с. 365.
18. *Higgins I.J., Best D.J., Hammond R.C.* Nature, 1980, v. 286, p. 561.
19. *DeLong E.F.* Nature, 2000, v. 407, p. 577.
20. *Shindell D.T.* Geophys. Res. Lett. (in press). http://www.giss.nasa.gov/gpol/abstracts/ip/Shindell.html
21. Chem.Eng.News, 2001, Feb. 12, p. 34.
22. *Hansen J., Sato M., Ruedy R., Lacis A., Oinas V.* Proc. Natl. Acad. Sci., 2000, v. 97, p. 9875. http://www.giss.nasa.gov/research/impacts/altscenario/
23. *Hansen, J., Sato M., Ruedy R. E. a.* J.Geophys.Res., 1997, v. 102, № D22, p. 25679.
24. *Love C.D., Brenninkmeijer C.A.M., Manning M.R. e. a.* Nature, 1988, v. 332, p. 522.
25. http://www.epa.gov/globalwarming/climate/index.html
26. *Malin C.B.* Oil & Gas J., 2000, Aug. 28, p. 58.
27. http://www.epa.gov/globalwarming/publications/emissions
28. *Coboter A.A.A., Brkic D., Cooperberg D.C., Sep K.* Oil & Gas J., 2001, Feb. 26, p. 58.
29. *Marxsen C.S.* Ibid., 2001, Feb. 26, p.20.
30. Oil & Gas J., 2000, Oct. 30, p. 21.
31. Chem. Eng. News, 2001, Feb. 12, p. 28.
32. *Арутюнов В.С., Басевич В.Я., Веденеев В.И., Стрекова Л.Н. и др.* Химия в интересах устойчивого развития, 2000, т. 8, № 3, с. 327.
33. *Арутюнов В.С., Веденеев В.И., Стрекова Л.Н., Седых А.Д. и др.* Газовая промышленность, 2000, № 3, с. 62.
34. *Rawls R.L.* Chem. Eng. News, 2000, Sept. 18, p. 66.
35. CO_2 Capture, Utilization, and Sequestration. Division of Fuel Chemistry, ACS, 2000, Preprints of Symposia, v. 45, № 4.
36. *Капица П.Л.* УФН., 1976, т. 118, № 2, с. 307.
37. *Легасов В.А., Кузьмин И.И.* Природа, 1981, № 2, с. 8.
38. *Cavaney R.* Oil & Gas J., 2000, Nov. 13, p. 64.